第 27 卷 第 1 期　　水利电力机械　　Vol. 27 No. 1
2005 年 2 月　　WATER CONSERVANCY & ELECTRIC POWER MACHINERY　　Feb. 2005

·机械设计与制造·

FLUENT 软件在圆柱绕流模拟中的应用

Application of FLUENT software in the simulation of flow around a cylinder

徐元利[1] ,徐元春[2] ,梁兴[1] ,张进国[1]

XU Yuan-li[1] ,XU Yuan-chun[2] ,LIANG Xing[1] ,ZHANG Jin-guo[1]

(1. 武汉大学 动力与机械学院 ,湖北 武汉 430072 ; 2. 河南油田采油一厂江河矿 ,河南 南阳 474780)

(1. School of Power and Mechanical Engineering of Wuhan University ,Wuhan 430072 ,China ;2. Jianghe Ore Yard of the 1st Petroleum Production Factory of the Henan Oil Field ,Nangyang 474780 ,China)

摘 要:使用计算流体力学软件 FLUENT,模拟均匀来流绕固定圆柱的流动 ,模拟雷诺数为 20 ,40 ,100 时的绕流流动 ,得到流场的流函数等值线图和速度矢量图。计算结果表明:当雷诺数增加时 ,流动表现出一系列不同的构造。在雷诺数约为 40 前后流场有明显变化。小于这个数时 ,存在一对位置固定的旋涡。大于 40 时 ,流场开始变得不稳定 ,旋涡扩大、脱落、又生成 ,逐渐发展成两排周期性摆动和交错的旋涡。并与实验及数值模拟结果比较 ,确认 FLUENT 能够很好地预测流动结构。

关键词:圆柱绕流;FLUENT 软件;雷诺数

中图分类号:TP311. 56 :TB126　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1006 - 6446(2005) 01 - 0039 - 03

Abstract:Uniform flow around a mounting cylinder is simulated with the application of FLUENT software while Reynolds number is 20 ,40 ,100. Stream function and velocity vector distributions are indicated. The results show that a series of construction appears as Reynolds number increases. When Re is around 40 , flow pattern changes :there is a pair of mounting vortex with Re less than 40 ;on the contrary it becomes unsteady and vortex expand , slough , generate again until two rows of periodic swing and overlap vortex form. Compared with experimental results ,it is confirmed that FLUENT can well predict flow structure.

Key words:flow around a circular cylinder ;FLUENT software ;reynolds number

1 圆柱绕流理论分析研究的状况

一个世纪以来 ,圆柱绕流一直是众多理论分析、实验研究及数值模拟对象。但迄今对该流动现象物理本质的理解仍是不完整的。圆柱绕流中 ,起决定作用的是雷诺数 ,但还受到许多因素 ,如阻塞比 ,来流湍流度 ,下游边界条件等的影响。

随着雷诺数的增加 ,粘性不可压缩流体绕圆柱的流动会呈现各种不同的流动状态 ,在小雷诺数时 ,流动是定常的 ,随着雷诺数的增加 ,圆柱后会出现一对尾涡。当雷诺数较大时 ,尾流首先失稳 ,出现周期性的振荡。而后附着涡交替脱落 ,浮入尾流形成 Karman 涡街 ,随着雷诺数的增加 ,流动变得越来越复杂 ,最后发展为湍流。White[1]认为"圆柱涡流具有经典性的重要意义"。

一般认为圆柱绕流有 2 种定常的流动图案:雷诺数为较小时 ,圆柱后无尾涡;当雷诺数为较大时 ,圆柱后有一对对称的尾涡。关于定常流失稳以及出现湍流的临界雷诺数主要是通过应用流场显示技术观察流动形态得到的 ,所以不是准确值。对于分界点雷诺数就有不同的见解 , Kovasznay ,Roshko 等认为定常流动失稳的临界雷诺数大约为 40。而从周期性尾流到湍流的详细的转变过程的实验研究似乎还是空白。

对均匀来流绕固定圆柱的二维平面流动 ,国内

收稿日期:2004 - 07 - 30

作者简介:徐元利(1980 -) ,女 ,河南南阳人 ,武汉大学动力与机械学院在读硕士研究生 ,从事流体过渡过程方面的研究。

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

外许多学者进行过大量的研究。决定圆柱绕流流态的是雷诺数(Re) 的值 , $Re<5$ 时 ,流动不发生分离 , $5<Re<40$,在圆柱体后面出现一对位置固定的旋涡 ;$40<Re<150$,旋涡扩大 ,然后有一个旋涡开始脱落 ,接着另一个也脱落 ,在圆柱体后面又生成新的旋涡 ,这样逐渐发展成两排周期性摆动和交错的旋涡 ,即 Karman 涡街。$Re<150$,涡街是层流 ,$150<Re<300$,旋涡由层流向湍流转变。$300<Re<3\times10^5$,称为亚临界区。此时 ,柱体表面上的边界层为层流 ,而柱体后面的涡街已完全转变为湍流 ,并按一定的频率发放旋涡。$3\times10^5<Re<3\times10^6$,称为过渡区。此时 ,柱体表面上的边界层也转变为湍流 ,分离点后移 ,阻力显著下降 ,旋涡的发放不规则 ,发放频率是宽频率随机的。$Re<3\times10^6$ 称为超临界区。此时 ,重新建立起比较规则的准周期性发放的涡街。目前 ,对圆柱绕流的三维数值研究则不多 ,然而试验表明 ,即使均匀来流垂直流过等截面的圆柱体 ,当 Re 足够大时 ,也会呈现三维的流动状态。

圆柱绕流属于非定常分离流动问题 ,在工业工程中的应用非常广泛 ,数值模拟是研究这类问题的有力工具。但是 ,控制方程的高度非线性以及边界条件的多样性严重阻碍了这类问题的解决。到目前为止 ,有限差分、有限元、大涡模拟(LES) 、直接数值模拟(DNS) 等方法都先后被应用。但是 ,这些方法都需要增加网格生成的附加工作 ,尤其是在遇到复杂几何区域时更需要巨大的网格数量 ,大大影响计算效率。

本文利用 N-S 方程 ,对固定圆柱绕流进行了三维数值模拟 ,利用计算流体力学软件 FLUENT ,选取 $Re=20,40,100$,模拟了圆柱周围的流场 ,得到流场的涡量等值线和速度矢量图 ,并与实验结果进行了比较。

2 数学模型与数值方法

对不可压缩粘性流体 ,在直角坐标系下 ,其运动规律可用 N-S 方程来描述 ,连续性方程和动量方程分别为

$$\partial u_j / \partial x_j = 0 , \tag{1}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_j u_i) = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\nu\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) 。\tag{2}$$

圆柱周围的流场利用 FLUENT 求得 ,采用有限体积法和 SMPLEC 算法。

3 数值计算与结果讨论

一个无穷长直径为 Ø2.0 m 的圆面积柱体 ,放置在无穷远来流速度为 1.0 m/s 不受干扰的均匀横流中 ,其他参数如图 1、图 2 所示。

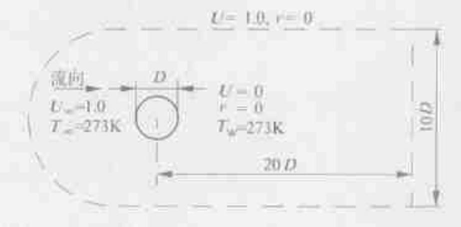

图 1 计算域

雷诺数由圆柱体直径和自由来流速度确定。通过改变粘度 ,得到不同的雷诺值(20 ,40 ,100) , $Re=\rho UD/\mu$,当雷诺数为 100 时 ,试验的 Strouhal 数是 0.165 , $S=D/\tau U$ 。

边界条件 :进口和侧面边界始终为自由来流条件 $U_\infty=1.0$ m/s ,流动出口为零法向梯度出口边界。

流体特性假定为常数 ,结果见表 1。

表 1 流体特性

Re	20	40	100
密度 ρ/ (kg/m^3)	1	1	1
动力粘度 μ/ (Pa·s)	0.1	0.05	0.02

网格示意图如图 2 所示。

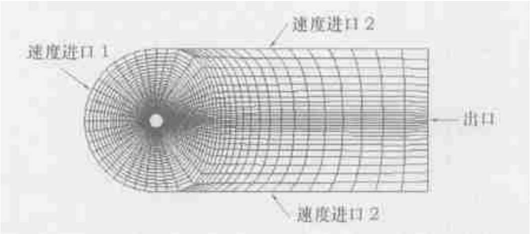

图 2 网格剖分

$Re=20$ 和 $Re=40$ 时的流函数和速度矢量如图 3、图 4、图 5、图 6 所示 ,流动是对称的。

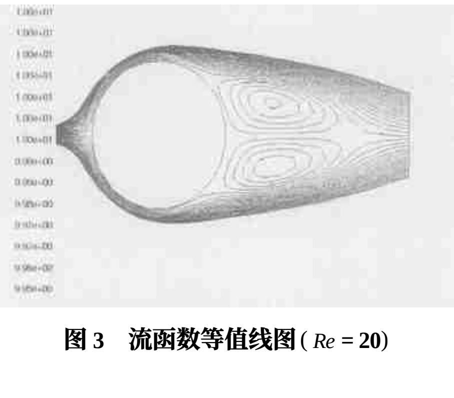

图 3 流函数等值线图($Re=20$)

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

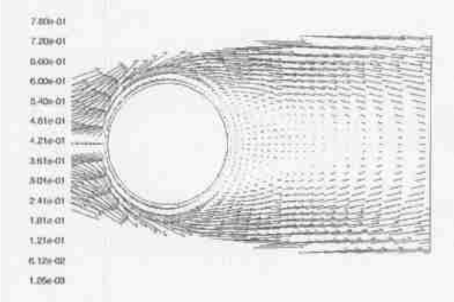

图 4　速度向量图(*Re* = 20)

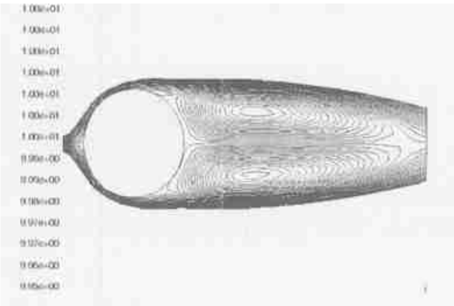

图 5　流函数等值线图(*Re* = 40)

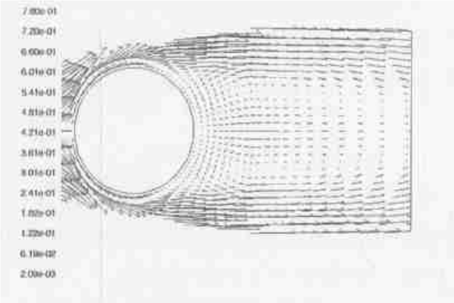

图 6　速度向量图(*Re* = 40)

Re = 100 时的流函数和速度矢量如图 7、图 8 所示。

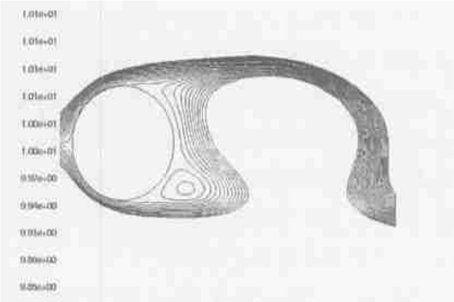

图 7　流函数等值线图(*Re* = 100)

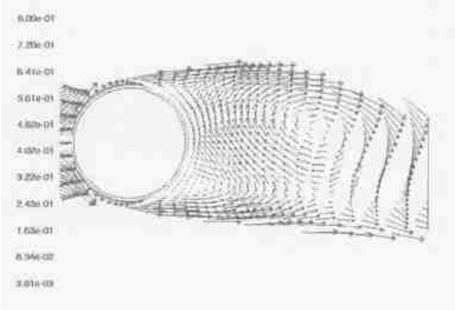

图 8　速度向量图(*Re* = 100)

4　结论

(1) 计算结果表明:当雷诺数增加时 ,流动表现出一系列不同的构造。在 $Re < 40$ 时 ,存在一对位置固定的旋涡。$Re > 40$ 时 ,流场开始变得不稳定 ,旋涡扩大、脱落、又生成 ,逐渐发展成两排周期性摆动和交错的旋涡。与实验及数值模拟结果比较 ,确认 FLUENT 能够很好地预测流动结构。

(2) 利用计算流体力学软件 FLUENT 可以成功地模拟圆柱绕流问题 ,反映出流动特性。

(3) 可以对大于 100 的雷诺数做进一步的研究 ,探讨其机理。

参考文献:

[1] Frank M. White. Viscous Fluid Flow[M]. McGraw-Hill Inc , 1974.

[2] 酆庆增. 圆柱绕流的非线性动力学[J]. 力学进展 ,1994 ,24(4) :525～544.

[3] 苏铭德 ,康钦军. 亚临界雷诺数下圆柱绕流的大涡模拟[J]. 力学学报 ,1999 ,31(1) :100～105.

[4] 叶春明 ,吴文权. 数值模拟圆柱绕流旋涡生成、分离及演化[J]. 华东工业大学学报 ,1995 ,17(4) :25～30.

[5] 叶春明 ,吴文权. 数值模拟圆柱绕流旋涡运动及尾流不稳定性分析[J]. 工程热物理学报 ,1997 ,18(2) :169～172.

[6] 陈斌 ,郭烈锦 ,杨晓刚. 圆柱绕流的离散涡数值模拟[J]. 自然科学进展 ,2002 ,12(9) :964～969.

[7] 万德成. 用水深平均雷诺方程模拟有限长直立圆柱绕流[J]. 上海大学学报 ,1995 ,1(3) :259～268.

(编辑:王书平)

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd.　All rights reserved.